Aus der Medizinischen Poliklinik der Universität
Erlangen – Nürnberg

Direktor: Professor Dr. C. Korth

Vergleichende Messungen der Kohlensäureausscheidung an drei verschiedenen Systemen der Ergospirometrie und die Möglichkeit der Korrektur differierender Ergebnisse

Inaugural – Dissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Hohen Medizinischen Fakultät
der
Friedrich – Alexander – Universität
Erlangen – Nürnberg

vorgelegt von
Harald Hauer
aus Plan

1972 № 235

Aus der Medizinischen Poliklinik der Universität Erlangen – Nürnberg
Direktor: Professor Dr. C. Korth

Vergleichende Messungen der Kohlensäureausscheidung an drei verschiedenen Systemen der Ergospirometrie und die Möglichkeit der Korrektur differierender Ergebnisse

Inaugural – Dissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Hohen Medizinischen Fakultät
der
Friedrich – Alexander – Universität
Erlangen – Nürnberg

vorgelegt von
Harald H a u e r
aus P l a n

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Herrn Professor Dr. J. Schmidt möchte ich für die Überlassung des Themas und die stete Hilfe herzlich danken. Meinen Dank auch Fräulein Bergmann vom Sportmedizinischen Institut, die sich stets hilfsbereit für die Arbeit einsetzte.

Gedruckt mit der Erlaubnis der Medizinischen Fakultät der Universität Erlangen–Nürnberg

Dekan: Professor Dr. G. Koch

Referent: Professor Dr. J. Schmidt

Korreferent: Professor Dr. C. Korth

Tag der mündlichen Prüfung: 9., 10., 14. März 1972

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
A.	ZUSAMMENFASSUNG	1
	I Forderungen über den Versuchsablauf	2
	II Forderungen, die einen Vergleich der Ergebnisse ermöglichen	2
	1. Schwellen	3
	2. Praktisches Vorgehen bei Schwellenkorrektur	3
	3. Differenzquotient	4
	4. Auswertung	5
B.	EINLEITUNG	6
C.	PROBLEMSTELLUNG	6
D.	METHODIK	7
	I Systeme der Ergospirometrie	7
	II Versuchsablauf	10
	1. Versuchsreihen	10
	2. Allgemeine Versuchsbedingungen	11
	3. Systemspezifischer Versuchsablauf	11
	III Auswertungsverfahren	12
	IV Schwellenbestimmung	13
	V Bestimmung des Differenzquotienten	14
	VI Korrektur der Meßergebnisse	14
E.	VERSUCHSERGEBNISSE	16
	I Ergebnisse ohne Korrekturen	16
	II Schwellenfindung bei Versuchsreihe III	20
	III Nachweis eines systematischen Fehlers bei dem geschlossenen System	21
	IV Objektive Meßergebnisse mit Korrekturen	22
	V Subjektive Meßergebnisse	27
	VI Übersicht über die Relativwerte der Versuchsergebnisse	28

Seite

F. DISKUSSION DER VERSUCHSERGEBNISSE 30

G. LITERATURANGABE 34

A. ZUSAMMENFASSUNG

Es ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, die Frage zu klären, ob offenes, geschlossenes und ventilgesteuertes System in den geforderten Bereichen gleichwertige Meßergebnisse liefern. Sollte das nicht der Fall sein, so sollen Möglichkeiten zur Korrektur angegeben werden, die es gestatten, die Meßdaten der verschiedenen Systeme lückenlos ineinander überführen zu können. Die Hauptforderung an die vorliegende Arbeit ist also die Entwicklung eines allgemein brauchbaren Verfahrens, das es ermöglicht, Ergebnisse von Kohlensäureausscheidungsmessungen an verschiedenen Systemen der Ergospyrometrie objektiv miteinander vergleichen zu können.

Die Versuche zu dieser Arbeit haben gezeigt, daß die Meßergebnisse der drei Systeme sich sehr voneinander unterscheiden.

Das liegt einmal an den verschiedenen Meßmethoden der Systeme, zum anderen arbeiten die Meßfühler der einzelnen Systeme unterschiedlich und zum Teil ungenau. Das ist die wesentlichste Fehlerquelle bei Vergleichsmessungen.

Auf Grund der unterschiedlichen Meßergebnisse muß man sich überlegen, ob es richtig ist, Arbeiten, die auf Meßergebnissen verschiedener Systeme aufbauen, miteinander objektiv zu vergleichen.

Um diesen Vergleich zu ermöglichen und auf Grund der Meßergebnisse der vorliegenden Arbeit stellen wir Forderungen über Versuchsablauf und Auswertungsmethode von Messungen der Kohlensäureausscheidung während Belastung bis 150 Watt.

I Forderungen über den Versuchsablauf

1. Vor Beginn der Belastungsphase soll die Versuchsperson mindestens fünf Minuten an das System angeschlossen sein. Mit dieser Voratmung ohne Belastung soll die Schwelle, der Ausgangswert in Ruhe, gefunden werden. Ermittelt wird die Schwelle durch Mittelung der Minutenwerte der Kohlensäureausscheidung.

2. Die Dauer und Intensivität der Belastung sind vom Versuchsleiter für die geforderte Problematik zu erstellen. Sinnvoll ist eine Belastung von 100 Watt, 125 Watt und 150 Watt und eine Belastungsdauer von jeweils sechs Minuten pro Belastungsstufe. Im übrigen gelten für ergospirometrische Belastungsuntersuchungen die Richtlinien wie sie auf dem II. Internationalen Seminar für Ergometrie in Berlin vom Standardisierungskomitee für Ergometrie festgelegt wurden.

3. Die Dauer der Nachatmung bis zum Abgleich des erhöhten Kohlensäurepartialdruckes in der Ausatmungsluft ist von der vorausgegangenen Belastung abhängig. Sie kann mit dem unten angegebenen Verfahren der Differenzquotientenbildung bereits während des Versuchsablaufes bestimmt werden.

II. Forderungen, die einen Vergleich der Ergebnisse ermöglichen.

Aus diesen Forderungen an spirometrische Meßreihen zur Bestimmung der Kohlensäureausscheidung während Belastung lassen sich folgende Punkte für eine Objektivierung von Meßergebnissen beim Vergleich verschiedener Systeme herausstellen.

1. Schwellen

a) Wir ermitteln in der Voratmungsphase die Minutenwerte der Kohlensäureausscheidung und bekommen die Voratmungsschwelle oder Ruheschwelle.

b) Die Dauer der Nachatmung, die für die Berechnung der Nachatmungsschwelle in Betracht kommt, kann nur durch den Differenzquotienten bestimmt werden. Die Rückkehr der Differenzquotientenkurve nach dem terminalen negativen Leistungsabbruchgipfel auf das 100%-Niveau sagt nichts darüber aus, ob sich die Schwelle im Vergleich zur Voratmung verschoben hat, sondern nur, daß sich wieder ein Gleichgewicht gebildet hat. Der simultane Vergleich der Differenzquotientenkurve und der Kurve der Absolutausscheidungswerte in Abhängigkeit von der Zeit ist für die Erkennung einer Schwellenverschiebung unbedingt nötig. Eine Schwellenverschiebung zeigt sich auch beim Vergleich der Absulutwerte der Vor- und Nachatmungsschwelle.

c) Die Gesamtschwelle wird als Mittelwert der Vor- und Nachatmungsschwelle ermittelt. Dabei müssen jeweils die Minutenwerte, die über eine gleiche Zeitdauer während der Vor- und Nachatmungsphase berechnet wurden, gemittelt werden. Die Schwellen und ihre Bezeichnungen sind für eine objektive Berichterstattung unerläßlich.

2. Korrektur der Schwellen

a) Zunächst rechnen wir alle CO_2-Werte, die an den drei Systemen errechnet wurden, in STPD-Werte um entsprechend dem Bericht der Kommission der Deutschen Gesellschaft für Innere Medizin zur Normung der Nomenklatur und der Symbole von Atemgrößen.

b) Wir ermitteln die systemspezifische Gesamtschwelle der CO_2 Ausscheidung. Um die drei Systeme miteinander vergleichen zu können, wählen wir willkürlich eines zum Bezugssystem und bestimmen die Schwellenabweichungen der zu testenden Systeme vom Bezugssystem.

Die Schwellenkorrektur geht so vor sich, daß wir das Produkt aus Schwellenabweichung mit der Dauer der Belastungsphase bilden. Dieses Abweichungsprodukt addieren oder subtrahieren wir mit dem umgekehrten Vorzeichen seiner Abweichung vom STPD-Mittelwert aus der Leistungsphase des zu korrigierenden Systems.

c) Die Meßergebnisse des geschlossenen Systems zeigen einen systematischen Fehler der Apparatur auf. Die Abweichung von Vor- und Nachatmungsschwelle von annähernd 30 % beweisen diesen Fehler. Mit der Gesamtschwelle kann dieser Fehler korrigiert werden, da sie die gegensinnigen Abweichungen von Vor- und Nachatmungsschwelle ausgleicht.

3. Differenzquotient

Auf der Suche nach weiteren Anpassungsmöglichkeiten kamen wir durch experimentelle rechnerische Versuche zu einem neuen Verfahren, dem Differenzquotienten.

Darunter verstehen wir den Quotienten aus dem n-ten Minutenausscheidungswert an Kohlensäure und dem (n - 1)ten Minutenausscheidungswert. Diese Methode gibt sowohl im Zahlenwert wie in der graphischen Darstellung genau an, ob die verglichenen ergospirometischen Systeme mit identischer oder differenter Zeitverspätung der Meßfühler arbeiten.

B. EINLEITUNG

Die spirographische Funktionsdiagnostik des cardiopulmonalen Systems hat besonders in den letzten Jahrzehnten sehr an Bedeutung gewonnen. Einmal in ihrer großen Bedeutung erkannt, ist sie aus der klinischen Medizin nicht mehr fortzudenken. Sie ist heute auch ein fester Bestandteil der präventiven und rehabilitiven Medizin geworden, da sie mit moderner Meßmethodik eine synoptische Darstellung verschiedener pulmonaler und cardialer Funktionen in Ruhe und während körperlicher Belastung erlaubt.

Seit Mitte der zwanziger Jahre (KNIPPING, H. W. und Mitarbeiter) haben sich vom Prinzip her zwei Systeme durchgesetzt, nämlich das offene System und das geschlossene System. Erst vor einigen Jahren wurde das ventilgesteuerte System entwickelt, so daß jetzt drei Systeme in der Ergospirometrie verwendet werden. Diese drei Spirometer unterscheiden sich in ihrem Aufbau und ihrer Arbeitsweise erheblich von einander. Weiterhin existieren verschiedene Verfahren zur Auswertung der gewonnenen Meßergebnisse bei ergospirometrischen Meßreihen. Schließlich ist die Möglichkeit gegeben, daß ergospirometrische Apparaturen mit systematischen Fehlern behaftet sind. Aus diesen Gründen ist die Möglichkeit des Vergleichs gleichartiger Versuchsreihen an unterschiedlichen Systemen der Ergospirometrie mitunter erheblich eingeschränkt.

C. PROBLEMSTELLUNG

Es soll geklärt werden, ob offenes, geschlossenes und ventilgesteuertes System in den geforderten Bereichen gleichwertige Meßergebnisse liefern. Sollte das

nicht der Fall sein, so sollen Möglichkeiten zur Korrektur angegeben werden, des es gestatten, die Meßdaten der unterschiedlichen Systeme lückenlos ineinander überführen zu können.

Die Hauptforderung an die vorliegende Arbeit ist also die Entwicklung eines allgemein brauchbaren Verfahrens, das es gestattet, Ergebnisse von Kohlensäureausscheidungsmessungen an verschiedenen Systemen der Ergospirometrie objektiv miteinander vergleichen zu können.

D. METHODIK

1. Verwendete Systeme der Ergospirometrie

1. Geschlossenes System

Bei dem verwendeten Gerät handelt es sich um den MAGNA-Test Typ 610 der Firma Dargatz, Hamburg.

Der Spirograph MAGNA-Test Typ 610 hat einen geschlossenen Systemkreislauf. Der Proband ist über eine Atemmaske an ein Luftkreislaufsystem angeschlossen, dessen Luftvolumen von einer Pumpe laufend umgewälzt wird. Die Ventilation wird von einem Strömungsmesser direkt angezeigt und ist durch eine Drosselklappe kontinuierlich regelbar. Die Reinigung der Exspirationsluft von Kohlensäure geschieht in zwei parallelliegenden Natronkalkabsorbern. Die Kühlung der Absorber erfolgt durch Wasserumspülung. Die Bewegung der Spirometerglocken kann über ein Schreibersystem die einzelnen Atemzüge sichtbar machen.

2. Offenes System

Verwendet wurde die Apparatur SIREGNOST FD 78 der Firma Siemens. Die Errechnung der statischen und dynamischen Volumnia erfolgt beim

SIREGNOST FD 78 im offenen System elektronisch. Da der Proband beim offenen System die umgebende Raumluft atmet, entfällt hier die Problematik der Konstanterhaltung der Sauerstoffkonzentration und die Kohlensäureabsorption. Die Exspiration erfolgt über ein ventilgesteuertes Mundstück über einen Pneumotachographen. Die Aufzeichnung der elektronisch ermittelten statischen und dynamischen Volumnia, der exspiratorischen Kohlensäurekonzentration und der verschiedenen Funktionsdiagramme erfolgt durch einen Kompensationsschreiber. Die fortlaufende Registrierung des Pneumotachogramms, des Atemvolumens und der exspiratorischen Kohlensäurekonzentration erfolgt über ein Registriergerät vom Typ Minograph. Mit einer Eichvorrichtung lassen sich Druck und Volumen des Spirogramms laufend überprüfen. Die Atemstromwerte werden mittels eines Pneumomanometers, das aus einem Differenzial-Druckreceptor mit Verstärker besteht, gemessen. Die Messung der Änderungen der Atemstromgeschwindigkeit während der Respiration erfolgt durch einen Pneumotachographen nach FLEISCH. Die Versuchsperson atmet durch diesen rohrförmigen Atemstromreceptor, in dessen Lumen zur Aufrechterhaltung laminarer Strömung im geforderten Meßbereich viele kleine Kanäle eingebaut sind. Die der Strömungsgeschwindigkeit proportionalen Druckdifferenzen werden elektronisch ausgewertet und als Pneumotachogramm aufgezeichnet.

Die Strömungskapillaren werden zur Verhinderung der Kondensation des Wasserdampfes der Exspirationsluft auf 37 Grad Celsius aufgeheizt.

Durch entsprechende Anschlüsse am Meßkopf werden während der Untersuchung laufend Gasproben aus der Exspirationsluft abgenommen und analysiert. Dabei wird durch eine Pumpe, die vom Atemstrom elektronisch gesteuert ist, nur Exspirationsluft abgesaugt. Das abgesaugte Volumen ist dabei direkt proportional dem Atemstrom.

Die Kohlensäureanalyse erfolgt durch den Ultrarotabsorptionsschreiber - URAS-M der Firma Hartmann und Braun. Die Kohlensäurekonzentration wird hierbei nach dem Prinzip der Absorption infraroter Strahlung durch die im Meßgefäß vorhandenen CO_2-Moleküle bestimmt. Die Aufzeichnung der exspiratorischen Kohlensäurekonzentration erfolgt durch den Kompensographen.

Als Änderung der standardmäßigen Ausrüstung wurde an unserem SIREGNOST FD 78 ein Ventilator angebracht, der die Exspirationsluft abzog, um eine erneute Inspiration ausgeatmeter Luft zu verhindern.

3. Ventilgesteuertes System

Bei dem verwendeten ventilgesteuerten System handelt es sich ebenfalls um die Apparatur SIREGNOST FD 78 der Firma Siemens.

Anstelle der FLEISCH'SCHEN Meßdüse wird eine Maske verwendet. Inspiriert wird hier, wie beim offenen System reine Raumluft. Die Exspirationsluft wird durch ein Atemventil und einen Schlauch vom Mund des Probanden zu einem Mischkessel geleitet. Aus diesem Mischkessel wird ein konstantes Volumen zur Gasanalyse abgesaugt. Die Gasanalyse erfolgt wie beim offenen System.

Bei leichtgängigem und weitlumigem Ventil kann der Strömungswiderstand gering gehalten werden. Das Totraumvolumen beim ventilgesteuerten System beträgt ca. 40 ml. Damit ist der Rückatmungsanteil recht gering gehalten.

II Versuchsablauf

1. Versuchsreihen und Versuchsablauf

Es wurden drei Meßdurchgänge durchgeführt. Im folgenden als Versuchsreihe I, II, III bezeichnet. Die Probanden wurden in einer Versuchsreihe am offenen, geschlossenen und ventilgesteuerten System mit gleicher Belastung getestet.

In Versuchsreihe I wurden drei Belastungsstufen von je sechs Minuten gemessen. Die Intensivität der Belastungen waren 100 Watt, 125 Watt, 150 Watt. Probanden waren Männer im Alter von 25 Jahren.

In Versuchsreihe II wurden zwei Belastungsstufen von je sechs Minuten Dauer gemessen. Die Intensivität der Belastungen waren 100 Watt und 125 Watt. Anschließend mußten die Probanden zehn Minuten nachatmen. Probanden waren Mädchen im Alter von 22 Jahren.

In Versuchsreihe III wurden drei Belastungsstufen von je sechs Minuten gemessen. Die Intensivität waren 100 Watt, 125 Watt und 15o Watt. Die Probanden waren durchtrainierte Männer von 25 Jahren. In der Versuchsreihe III wurden die ausführlichsten Messungen durchgeführt. Die Probanden wurden an das System angehängt und mußten 15 Minuten ohne körperliche Belastung voratmen (Voratmungsphase). Dann erfolgte die Belastung mit 100 Watt, 125 Watt und 150 Watt jeweils sechs Minuten. Nach Beendigung der Belastung atmeten die Probanden noch 27 Minuten am System angeschlossen nach (Nachatmungsphase).

2. Allgemeine Versuchsbedingungen

a) Die Versuche fanden ausschließlich in der Zeit von 9 Uhr bis 11 Uhr vormittags statt. Vor den Versuchen unterzogen sich die Probanden keinerlei körperlicher Belastung.

b) Die mittlere Luftfeuchtigkeit betrug 49 %, der mittlere Barometerstand 731 mmHg und die mittlere Raumtemperatur 18 Grad Celsius.

3. Systemgebundener Versuchsablauf

Die Probanden traten jeweils in Sporthose und Sportschuhen an. Sie bestimmten die Sattelhöhe und die ihnen entsprechende Lenkradhöhe. Dann wurden sie an das System angeschlossen. Bei Versuchsreihe III: Voratmungsphase 15 Minuten, Leistungsphase 18 Minuten, Nachatmungsphase 27 Minuten.

a) Anschluß an das geschlossene System erfolgt durch eine Vollsichtmaske aus Plexiglas, die mit Gummisträngen am Hinterkopf fixiert ist. Ein aufblasbarer Gummischlauch dichtet die Maske ab. Die Maske schränkt die Bewegungsfreiheit des Kopfes stark ein. Nur geringe Dreh- und Nickbewegungen des Kopfes sind möglich.

b) Am offenen System erfolgt der Anschluß des Probanden an das System mit einem Plastikmundstück, das an den FLEISCH'SCHEN Pneumotachographiekopf gekoppelt ist. Die Haltung des Probanden ist verkrampft, da er durch die starre Apparatur fixiert ist.

c) Beim ventilgesteuerten System verbindet eine leichte Gummimaske, die Nase und Mund einschließt, über einen Schlauch den Probanden mit dem System. Im Gegensatz zum offenen System kann sich der Proband frei drehen und bewegen.

III Auswertungsverfahren

1. Alle Volumnia der CO_2-Messung werden wie bereits erwähnt in STPD-Werten angegeben. Die Umrechnung der vom System abgelesenen Werte erfolgt nach der Beziehung:

$$V_{CO_2} = V_{STPD} \cdot F_{CO_2}$$

V_{STPD} = Atemminutenvolumen unter Standardbedingungen

F_{CO_2} = CO_2 - Konzentration in der Exspirationsluft

STPD = T = 0° Celsius; p = 760 mmHg;
Luftfeuchtigkeit = 0 %

2. Spitzenwerte

Dabei werden STPD-Kohlensäureverbrauchsvolumina zu einem prägnanten Zeitpunkt des Versuches bestimmt. Hierfür bietet sich jeweils die letzte Minute der einzelnen Belastungsstufen, im vorliegenden Fall die 6. Minute der jeweiligen Belastungsstufen an. Wir nehmen deshalb die letzte Minute jeder Belastungsstufe, weil in dieser die größte CO_2-Ausscheidung gemessen wurde.

3. Additionswerte

Darunter verstehen wir die Summe der STPD-Minutenausscheidungswerte einer Belastungsstufe. Bei den vorliegenden Versuchsreihen entspricht das jeweils dem Summenwert der 1. mit 6., der 7. mit 12. und der 13. mit 18. Minute der Belastung.

Entscheidend für den Vergleich der drei Systeme der Ergospirometrie ist der Summenwert der gesamten Belastungsphase.

IV Schwellenbestimmung

Eine Schwellenbestimmung ist nur bei Versuchsreihe III möglich, da nur sie die erforderliche Vor- und Nachatmungsphase mit entsprechenden Dauern aufweist. Die Angabe Schwellen ist für eine objektive Berichterstattung und für einen Vergleich unerläßlich. Zur Schwellenbestimmung der einzelnen Phasen mitteln wir die minütlichen CO_2-Ausscheidungswerte zu einem Mittelwert, mit dem wir im folgenden zu rechnen haben.

1. Voratmungsschwelle aus 15 Minuten Voratmung
   a) Geschlossenes System
   b) Offenes System
   c) Ventilgesteuertes System
2. Voratmungsschwelle aus den ersten 5 Minuten der Voratmung
   a) Geschlossenes System
   b) Offenes System
   c) Ventilgesteuertes System
3. Nachatmungsschwelle

   Aus der Auswertung der Differenzquotientenkurve ergibt sich für alle drei Systeme ein Zeitbereich von der 11. mit der 20. Minute der Nachatmung für die Bestimmung dieser Schwelle.
   a) Geschlossenes System
   b) Offenes System
   c) Ventilgesteuertes System
4. Gesamtschwelle als Mittelwert der Voratmungsschwelle und der Nachatmungsschwelle

a) Geschlossenes System

b) Offenes System

c) Ventilgesteuertes System

V Bestimmung des Differenzquotienten

Um charakterische Züge der Ausscheidungskurve der Kohlensäure bei Belastung und in Ruhe zu ermitteln, erstellen wir eine Differenzquotientenkurve. Dabei wird der jeweils n-te Minutenausscheidungswert durch den (n-1)ten Ausscheidungswert dividiert.

Besonders ist bei der graphischen Darstellung auf Gipfelverschiebungen vom markierten Leistungseinsatzpunkt im Vergleich zu anderen Systemen zu achten. Solche Gipfelverschiebungen deuten auf eine Zeitverspätung einzelner Meßfühler hin und erfordern eine entsprechende Korrektur der Meßergebnisse der betroffenen Versuchsreihe.

An der Rückkehr der negativen Phase der Differenzquotientenkurve nach Belastungsende auf die 100-Prozentlinie ist der Abgleich der während Leistung vermehrt gebildeten Kohlensäure erkennbar. Von diesem Punkt des Abgleiches ab beginnt die Phase der Nachatmung, die für die Erstellung der Nachatmungsschwelle von Bedeutung ist.

VI Korrekturen der Meßergebnisse

1. Nach Schwellen

Wie schon in der Zusammenfassung erwähnt, muß, wenn man verschiedene Systeme vergleichen will, die Schwelle eines dieser Systeme als Bezugspunkt gewählt werden. Wir wählen willkürlich die Schwelle des geschlossenen Systems. Für den Vergleich der Systeme miteinander korrigieren wir

nun die beiden anderen Systeme auf die Werte des Bezugssystems. Die Schwellenkorrektur geht so vor sich, daß die Absolutwerte der Gesamtschwellen des offenen und ventilgesteuerten Systems in ihrer Abweichung vom geschlossenen geprüft werden. Diese Abweichung mit der Zeit der Versuchsphase multipliziert wird je nach umgekehrten Vorzeichen vom STPD-Mittelwert der Leistungsphase des Testsystems addiert oder subtrahiert.

2. Nach Zeit

Anhand der Differenzquotientenkurve ist nun zu überprüfen, ob eine Zeitverspätungskorrektur als nötig erscheint. Die Differenzquotientenkurve zeigt uns, wann ein System während einer Messung sich in seiner Meßfähigkeit ändert, das heißt, wann seine Meßfühler unterschiedlich ansprechen. In der Differenzquotientenkurve ist dies an den Verschiebungen der für die Belastungsstufen charakteristischen Gipfel in der Abszisse sichtbar. Wenn demnach eine Zeitverspätung des Systems festgestellt ist, dann werden die Meßkurven nach der Zeit entsprechend korrigiert. Die steil aufsteigenden Schenkel der Meßkurven der Kohlensäureausscheidung werden durch Parallelverschiebung zur Ordinate zur Deckung gebracht. An den Markierungspunkten des Leistungseinsatzes läßt sich nun in der Abszisse die Zeitverspätung ablesen. Wird die 30-Sekundenverspätung im Vergleich von Test- und Meßkurve unterschritten, so wird auf den ursprünlichen Kurvenpunkt bezogen, wird sie überschritten, dann wird auf den nächstfolgenden Kurvenpunkt als identischen Minutenausscheidungswert bezogen. Die Bezugsstrecke bleibt dabei natürlich immer gleich lang, d. h. der Leistungsabfallpunkt verschiebt sich gleichsinnig zum Leistungseinsatzpunkt.

E. VERSUCHSERGEBNISSE

1. Ergebnisse ohne Korrekturen

Bei den Prozentangaben der vorliegenden Arbeit handelt es sich durchwegs um Relativergebnisse innerhalb identischer Belastungsstufen, wobei das geschlossene System willkürlich als 100 % gesetzt wird.

1. Versuchsreihe I (STPD-Werte)

Kohlendioxydausscheidung in der reinen Belastungsphase.

Bei dieser Versuchsreihe wurden nur die Spitzenmessungen zu jeder 6. Minute der Belastungsphase durchgeführt.

a) Belastungsstufe 100 Watt

aa)	Geschlossenes System:	1300 ml = 100 %
bb)	Offenes System:	1475 ml = 113 %
cc)	Ventilgesteuertes System:	1527 ml = 117 %

b) Belastungsstufe 125 Watt

aa)	Geschlossenes System:	1852 ml = 100 %
bb)	Offenes System:	1747 ml = 94 %
cc)	Ventilgesteuertes System:	2172 ml = 117 %

c) Belastungsstufe 150 Watt

aa)	Geschlossenes System:	1987 ml = 100 %
bb)	Offenes System:	2169 ml = 109 %
cc)	Ventilgesteuertes System:	2218 ml = 111 %

2. Versuchsreihe II (STPD-Werte)

Kohlendioxydausscheidungsmessung ohne Voratmung, jedoch mit 10 Minuten Nachatmung nach Belastungsphase.

a) Spitzenmessungen zu jeder 6. Minute der Belastungsphasen

a) Belastungsstufe 100 Watt

aa) Geschlossenes System: 1552 ml = 100 %

bb) Offenes System: 1375 ml = 88,6 %

cc) Ventilgesteuertes System: 1355 ml = 87,3 %

b) Belastungsstufe 125 Watt

aa) Geschlossenes System: 2082 ml = 100 %

bb) Offenes System: 1761 ml = 84,5 %

cc) Ventilgesteuertes System: 1762 ml = 84,5 %

b) Additionswerte

Summen der Minutenausscheidungswerte jeder Belastungsstufe

a) Belastungsstufe 100 Watt

aa) Geschlossenes System: 6827 ml = 100 %

bb) Offenes System: 6199 ml = 90,8 %

cc) Ventilgesteuertes System: 5965 ml = 87,3 %

b) Belastungsstufe 125 Watt

aa) Geschlossenes System: 11461 ml = 100 %

bb) Offenes System: 9851 ml = 85,9 %

cc) Ventilgesteuertes System: 9870 ml = 86 %

c) Gesamtbelastung 100 und 125 Watt

aa) Geschlossenes System: 18288 ml = 100 %

bb) Offenes System: 16050 ml = 87,7 %

cc) Ventilgesteuertes System: 15835 ml = 86,6 %

3. Versuchsreihe III (STPD-Werte)

Kohlensäureausscheidungsmessung mit 15 Minuten Voratmung, mit Leistungsatmung

und anschließender Nachatmung von 27 Minuten Dauer.

a) Belastungsstufe 100 Watt

aa) Geschlossenes System: 1501 ml = 100 %

bb) Offenes System: 1436 ml = 95,6 %

cc) Ventilgesteuertes System: 1508 ml = 100,4 %

b) Belastungsstufe 125 Watt

aa) Geschlossenes System: 1925 ml = 100 %

bb) Offenes System: 1838 ml = 95,4 %

cc) Ventilgesteuertes System: 1879 ml = 97,6 %

c) Belastungsstufe 150 Watt

aa) Geschlossenes System: 2413 ml = 100 %

bb) Offenes System: 2245 ml = 93 %

cc) Ventilgesteuertes System: 2219 ml = 92 %

Additionswerte

Summen der Minutenausscheidung jeder Belastungsstufe

a) Belastungsstufe 100 Watt

aa) Geschlossenes System: 6735 ml = 100 %

bb) Offenes System: 7056 ml = 104,7 %

cc) Ventilgesteuertes System: 7156 ml = 106,3 %

b) Belastungsstufe 125 Watt

aa) Geschlossenes System: 10819 ml = 100 %

bb) Offenes System: 10367 ml = 95,7 %

cc) Ventilgesteuertes System: 10683 ml = 98,7 %

c) Belastungsstufe 150 Watt

aa) Geschlossenes System: 13346 ml = 100 %

bb) Offenes System: 12846 ml = 95,5 %

cc) Ventilgesteuertes System: 12565 ml = 94,1 %

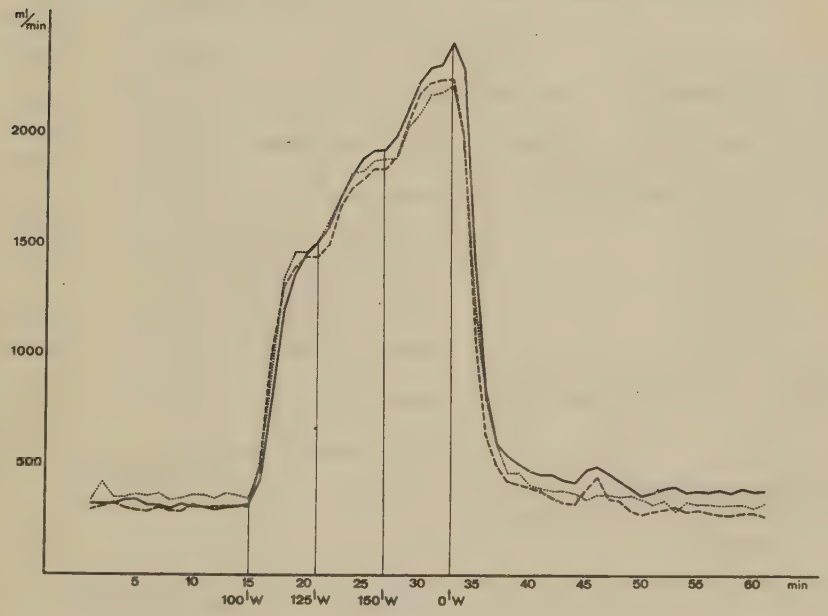
d) Gesamtbelastung: 100 + 125 + 150 Watt

aa) Geschlossenes System: 30900 ml = 100 %

bb) Offenes System: 30269 ml = 97,9 %

cc) Ventilgesteuertes System: 30408 ml = 98,4 %

Abbildung 1



Kohlensäureausscheidung in Ruhe und Belastung bei Versuchsreihe III bei geschlossenem, offenem und ventilgesteuertem System.

geschlossen ———— offen ---------- ventilgesteuert .....

II. Schwellenfindung bei Versuchsreihe III

1. Voratmungsschwelle aus 15 Minuten Voratmung

   a) Geschlossenes System: 313 ml

   b) Offenes System: 300 ml

   c) Ventilgesteuertes System: 355 ml

2. Voratmungsschwelle aus den ersten 5 Minuten der Voratmung

   a) Geschlossenes System: 235 ml

   b) Offenes System: 299 ml

   c) Ventilgesteuertes System: 361 ml

3. Nachatmungsschwelle aus den Minutenausscheidungswerten der 11. mit 20. Minute der Nachatmung (interpoliert)

   Bei den Nachatmungswerten des geschlossenen und offenen Systems wurden die kleinen Nachgipfel der CO_2-Ausscheidung, die durch das Umsetzen auf einen bequemeren Stuhl bedingt waren, durch Extrapolation ausgeschaltet.

   a) Geschlossenes System: 397 ml

   b) Offenes System: 309 ml

   c) Ventilgesteuertes System: 340 ml

4. Gesamtschwelle als Mittelwert der Voratmungsschwelle und der Nachatmungsschwelle (interpoliert).

			Abweichung vom offenen System
a)	GS:	355 ml	+ 50,5
b)	O.S:	304,5 ml	± 0
C)	VS:	348 ml	+ 43,5

5. Vergleich der beiden Voratmungsschwellen bei den drei Systemen der Ergospirometrie

System	15 Minuten	5 Minuten	Abweichung in % von der 15-Min.-Schwelle
Geschlossen:	313 ml	325 ml	3,8 %
Offen	300 ml	299 ml	0 %
Ventilgesteuert:	355 ml	361 ml	1,7 %

III. Nachweis eines systematischen Fehlers bei unserer verwendeten geschlossenen Apparatur.

1. Wie wir beim Vergleich der Vor- und Nachatmungsschwellen des geschlossenen Systems sehen, unterscheiden sich diese beiden Schwellen um 27 % des Wertes der Voratmungsschwelle. Diese Tatsache veranlaßte uns, alle drei Apparaturen in Leerversuchen zu testen. Dazu wurden die Probanden ohne Belastung an die entsprechenden Systeme angeschlossen. Beim offenen und ventilgesteuerten System änderte sich dabei der Minutenausscheidungswert an Kohlensäure innerhalb von 60 Minuten nicht. Beim geschlossenen System jedoch ergab sich ein linearer Anstieg der Meßergebnisse der Kohlensäureausscheidung innerhalb von 60 Minuten von 525 ml in der 1. Minute auf 730 ml in der 60. Minute. Berechnen wir nun die Mittelwerte, die bei Versuchsreihe III zur Bestimmung der Voratmungsschwelle und der Nachatmungsschwelle führten, so finden wir beim Leerversuch in Ruhe Mittelwerte für die Voratmungsschwelle von 537 ml/Minute und von 690 ml/Minute für die Nachatmungsschwelle. Der Anstieg von Voratmungsschwelle zu Nachatmungsschwelle beträgt demnach beim Leerversuch etwas über 28 % des Wertes der Voratmungsschwelle und ist mit dem Schwellenanstieg in

Versuchsreihe III mit 27 % der Voratmungsschwelle identisch. Der Nachweis des systematischen Fehlers bei der verwendeten geschlossenen Apparatur ist damit erbracht.

2. Korrektur des systematischen Fehlers durch die Gesamtschwelle.

Da der Bereich der Belastung genau zeitlich zwischen der Phase der Voratmungsschwelle und der Nachatmungsschwelle liegt, kann die Gesamtschwelle als Mittelwert von Vor- und Nachatmungsschwelle als Vergleichsschwelle herangezogen werden. Die Gesamtschwellen der drei Systeme werden somit voll vergleichsfähig.

IV. Objektive Meßergebnisse mit Korrekturen

Da nur die Versuchsreihe III die Voraussetzungen für Korrekturen bietet, handelt es sich im folgenden nur um die Meßergebnisse dieser Versuchsreihe.

1. Schwellenkorrektur (interpoliert)

a) Gesamtbelastung der reinen Arbeitsphase

	unkorr. Werte	Zeit	Abweich.	Schwell.korr. Endwert
aa) GS:	30900	- 18 .	50,5 =	29991 = 100 %
bb) OS:	30269	± 18 .	0 =	30269 = 100,9 %
cc) VS:	30408	- 18 .	43,5 =	29625 = 98,8 %

b) Die unkorrigierten Werte verhalten sich:

aa) GS: 100 %

bb) OS: 97,9 %

cc) VS: 98,4 %

c) Gesamtbelastung mit 10 Minuten Nachatmung

1. Unkorrigiert

aa) GS: 38883 ml = 100 %

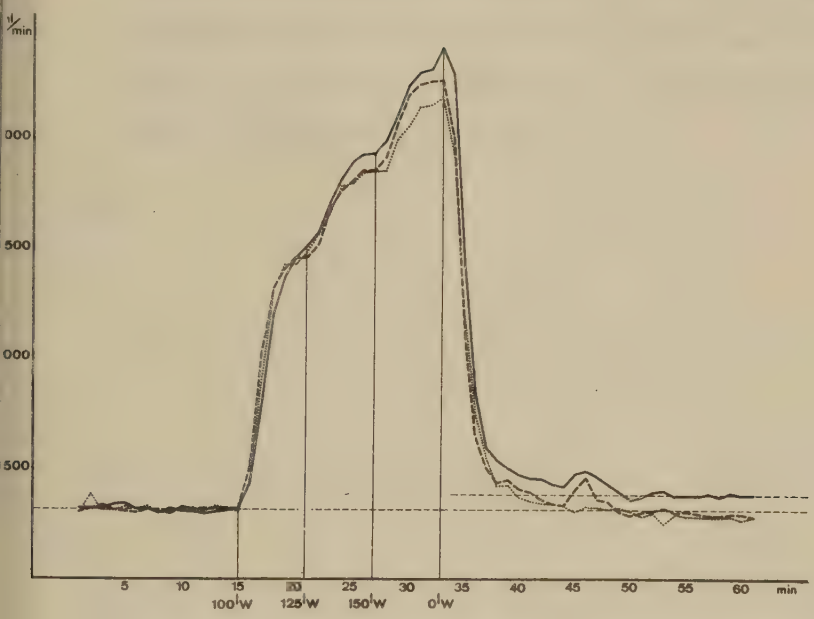
bb) OS: 36751 ml = 94,5 %

cc) VS: 37436 ml = 96,3 %

2. Schwellenkorrigiert

		unkorr. Werte	Zeit	Abweich.	Schwell.korr. Endwert
aa)	GS:	38883 ml	- 28 .	50,5	= 37469 ml = 100 %
bb)	OS:	36751 ml	± 28 .	0	= 36751 ml = 98,1 %
cc)	VS:	37436 ml	- 28 .	43,5 ml	= 36218 ml = 96,7 %

Abbildung 2



Schwellenkorrektur der Versuchsreihe III bei Kohlensäureausscheidung in Ruhe und Belastung bei geschlossenem, offenem und ventilgesteuertem System.

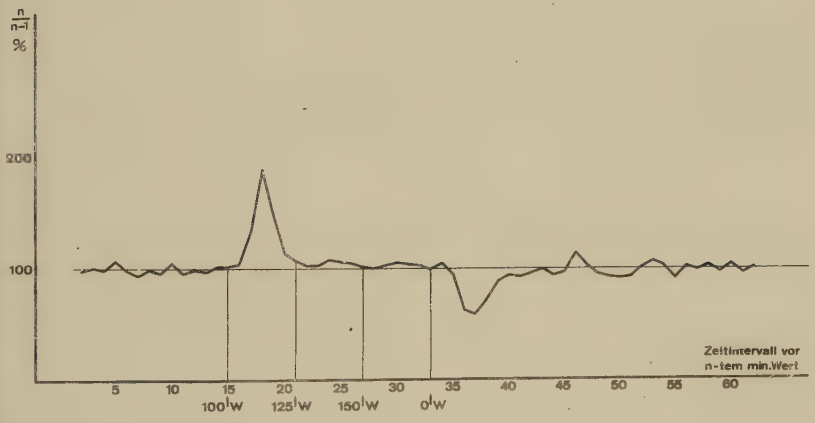
Das geschlossene System ist wegen der besseren Übersicht nur nach Voratmungsschwelle korrigiert gezeichnet.

In der Endphase muß die Kurve des geschlossenen Systems noch um $\frac{1}{2}$ · (Nachatmungsschwelle - Voratmungsschwelle) in Richtung Abszisse gesenkt werden.

2. Zeitverspätungskorrektur

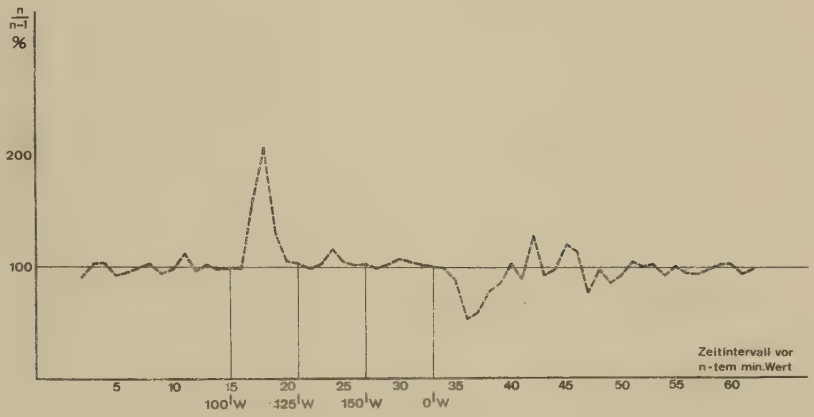
Wie sich aus dem Vergleich der Differenzquotientenkurven der drei Systeme ergibt, ist eine Zeitverspätungskorrektur bei der Kohlensäureausscheidungsmessung in Versuchsreihe III nicht nötig, da die Zeitverspätung unter 30 Sekunden bleibt, wie die graphische Darstellung der Meßwerte zeigt.

Abbildung 3



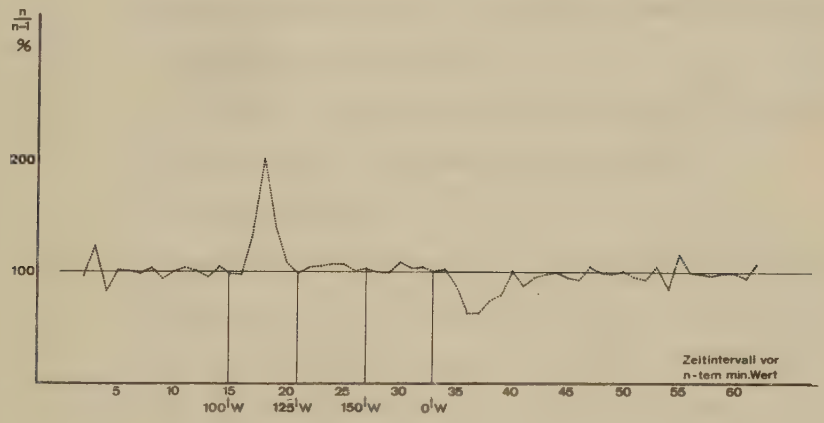
Differenzquotientenkurve des geschlossenen Systems bei Versuchsreihe III

Abbildung 4



Differenzquotientenkurve des offenen Systems bei Versuchsreihe III

Abbildung 5



Differenzquotientenkurve des ventilgesteuerten Systems bei Versuchsreihe III

3. Gesamtkorrektur

Die schwellenkorrigierten Werte sind identisch mit den gesamtkorrigierten Ergebnissen, da eine Zeitverspätungskorrektur hier entfällt.

V. Subjektive Meßergebnisse

1. Geschlossenes System

Da der Gummischlauch und die Maske fest angezogen sind, entstehen bei den Probanden nach ca. 20 Minuten Schmerzen an den Auflagestellen an Stirn und Unterkinn, die im weiteren Verlauf des Versuches fast unerträglich werden.

Jede Versuchsperson klagte nach dem Versuch über Kopfschmerzen und Schwindelgefühl.

2. Offenes System

Die beim offenen System auf 37° Celsius aufgeheizte Luft läßt Mund und Rachen der Probanden nach etwa 15 bis 20 Minuten so austrocknen, daß jede Schluckbewegung schmerzhaft wird.

In der langen Nachatmungsphase treten Schmerzen im Rücken und Nacken auf, die durch die starre Haltung des Kopfes bedingt sind.

3. Ventilgesteuertes System

Besonders angenehm wird von den Versuchspersonen die bequeme Haltung während des Versuches empfunden. Die kleine Maske belastet so wenig, daß weder Muskelschmerzen noch getrübter Bewußtseinsgrad angegeben werden. Sowohl während der Belastung, wie auch während der Nachatmungsphase wird das ventilgesteuerte System als das bequemste empfunden.

VI. Übersicht über die Relativwerte der Versuchsergebnisse

1. Unkorrigierte Werte

a) Spitzenwerte (zu jeder 6. Minute der Belastungsstufen)

Versuchsreihe I

Verhältnis:	Geschlossen	: offen	: ventilgesteuert =
Bei 100 Watt:	100	: 113	: 117
Bei 125 Watt:	100	: 94	: 117
Bei 150 Watt:	100	: 109	: 111

Versuchsreihe II

Verhältnis:	Geschlossen	:	offen	:	ventilgesteuert =
Bei 100 Watt:	100	:	88,6	:	87,3
Bei 125 Watt:	100	:	84,5	:	84,5

Versuchsreihe III

Verhältnis:	Geschlossen	:	offen	:	ventilgesteuert =
Bei 100 Watt:	100	:	95,6	:	100,4
Bei 125 Watt:	100	:	95,4	:	97,6
Bei 150 Watt:	100	:	93	:	92

b) Additionswerte:

Versuchsreihe I

Additionswerte nicht bestimmt

Versuchsreihe II

Verhältnis:	Geschlossen	:	offen	:	ventilgesteuert =
Bei 100 Watt:	100	:	90,8	:	87,3
Bei 125 Watt:	100	:	85,8	:	86,1
Bei Gesamtbelastung:	100	:	87,7	:	86,6

Versuchsreihe III

Verhältnis:	Geschlossen	:	offen	:	ventilgesteuert =
Bei 100 Watt:	100	:	104,7	:	106
Bei 125 Watt:	100	:	95,7	:	98,7
Bei 150 Watt:	100	:	95,5	:	94,1
Bei Gesamtbelastung:	100	:	97,9	:	98,4

2. Korrigierte Ergebnisse (Nur Schwellenkorrektur nötig)

a) Reine Arbeitsphase (18 Minuten Belastung)

Verhältnis: Geschlossen : offen : ventilgesteuert =

100 : 100,9 : 98,8

b) Gesamtbelastung mit 10 Minuten Nachatmung bis zum Abgleich der Kohlensäure

Verhältnis: Geschlossen : offen : ventilgesteuert =

100 : 98,1 : 96,7

F. DISKUSSION DER VERSUCHSERGEBNISSE

1. Differenz der Ergebnisse

Die verschiedenen Meßergebnisse zeigen den Unterschied der Systeme. Da die Meßreihen an jedem System die gleichen Versuchsbedingungen und den gleichen Versuchsablauf hatten, muß das Differieren der Ergebnisse im Meßverfahren des jeweiligen Systems zu suchen sein. Die drei Systeme geschlossen : offen : ventilgesteuert sind einander in keiner Weise gleichwertig, wohl aber das offene dem ventilgesteuerten, wie die annähernd gleichen Ergebnisse beweisen. Die Abweichung des ventilgesteuerten und offenen Systems bei einer durchschnittlichen Arbeitsphase von 15 Minuten ist ca. 8 Prozent, das bedeutet pro Minute ca. 1/2 Prozent.

Die Männer liegen bei beiden Systemen durchschnittlich 3,7 % unter dem Vergleichswert des geschlossenen Systems, die Frauen bei 13,1 %.

Ein Vergleich der Voratmungsschwellen der drei Systeme beweist den unterschiedlichen Ausgangswert. Die Voratmungsschwelle der Meßreihe III aus

den ersten 5 Minuten differiert zum offenen System um 12 %, und zum ventilgesteuerten System um 15 %.

Vergleichen wir weitere Ergebnisse des ventilgesteuerten und offenen mit denen des geschlossenen Systems, so unterscheiden sich die Spitzenmessungen um 7 % bzw. um 8 %, die Additionswerte um 4,5 % bzw. um 5,9 % von den Werten des geschlossenen Systems.

Nehmen wir nun von Meßreihe I die Ergebnisse gleicher Belastungsstufen des offenen und ventilgesteuerten Systems, bestimmen die gemeinsamen Mittelwerte und vergleichen mit den ursprünglichen Mittelwerten, so unterscheiden sie sich nur um 0,9 % und liegen durchschnittlich 3,5 % unter dem Niveau des geschlossenen Systems.

Gehen wir bei Meßreihe II nach dem gleichen Schema vor, so erhält man folgendes Ergebnis:

Die gemeinsamen Mittelwerte aus den Ergebnissen des offenen und ventilgesteuerten Systems unterscheiden sich von den jeweiligen ursprünglichen Mittelwerten nur um 0,2 % und liegen durchschnittlich 13 % unter den Vergleichswerten des geschlossenen Systems.

Bei der Meßreihe III finden wir noch ein ähnliches Ergebnis wie in der Meßreihe I, nämlich einen Unterschied von 0,7 % zu den ursprünglichen Mittelwerten und einen Unterschied von 3,8 % zum geschlossenen System.

Diese Beispiele lassen erkennen, daß die Werte des ventilgesteuerten und offenen zueinander harmonieren und zum geschlossenen System different sind.

II. Beweis für ventilgesteuertes System

Wollen wir ermitteln, ob ventilgesteuertes oder offenes System genauer mißt, so vergleichen wir identische Leistungsstufen der Meßreihe I mit Meßreihe III nach

Systemen getrennt und die Abweichung der Serie III in Prozent der Serie I. (Der Zeitraum zwischen Versuchsreihe I und III beträgt 8 Wochen)

Ventilgesteuertes System

	I	III	Abweichung in % I
100 Watt:	1527	1508	- 1,2 %
150 Watt:	2218	2219	0 %

Mittelwert der Abweichung mit Berücksichtigung des Vorzeichens: - 0,6 %

Mittelwert der Abweichung ohne Berücksichtiung des Vorzeichens: 0,6 %

Offenes System

	I	III	Abweichung in % I
100 Watt:	1475	1437	- 2,5 %
150 Watt:	2169	2244	+ 3,5 %

Mittelwert der Abweichung mit Berücksichtigung des Vorzeichens: + 0,5 %

Mittelwert der Abweichung ohne Berücksichtigung des Vorzeichens: 3,0 %

Geschlossenes System	I	III	Abweichung in % I
100 Watt:	1300	1501	+ 15 %
150 Watt:	1987	2413	+ 21 %

Mittelwert der Abweichung mit Berücksichtigung des Vorzeichens: + 18 %

Mittelwert der Abweichung ohne Berücksichtigung des Vorzeichens: 18 %

Aus dem Ergebnis, daß die mittlere Abweichung einer Versuchsreihe mit Spitzenwertbestimmung zur belastungsidentischen anderen beim ventilgesteuerten System nur - 0,6 % bei gleichen Vorzeichen der Abweichung, beim offenen System + 0,5 % bei allerdings unterschiedlichem Vorzeichen der Abweichung und 3 % ohne Vorzeichenberücksichtigung und beim geschlossenen System + 18 % bei gleichsinniger Abweichung

beträgt, läßt die Behauptung zu, daß ventilgesteuertes System und offenes System die stabilsten Meßfühler für Kohlensäureausscheidungsmessungen besitzen und das ventilgesteuerte System wiederum genauer als das offene System mißt.

III. Fehler beim geschlossenen System

Die starke Abweichung beim geschlossenen System, Nachweis eines systematischen Fehlers des geschlossenen Systems, wie das Davonlaufen der Schwelle bei Versuchsreihe III und im Leerversuch, deuten auf eine Instabilität der Meßfühler für Kohlensäurebestimmung und auf einen systematischen Fehler des Systems hin. Eine Korrektur ist jedoch durch Ermittlung der Gesamtschwelle und Umsetzung auf Normalschwelle möglich.

IV. Zeitverspätung tritt beim Vergleich unserer drei Apparaturen nur geringfügig auf, liegt aber bei anderen Geräten durchaus im Bereich der Möglichkeit und ist dann mittels der Differenzquotientenkurve zu erkennen und durch Parallelverschiebung der Meßkurve in die Erkennungsbereiche der Testkurven zu korrigieren.

Die entscheidende Erkenntnis, die wir aus der vorliegenden Arbeit gewinnen konnten ist die Tatsache, daß es Möglichkeiten gibt, bei Angabe der Absolutwerte bei Belastung, der Gesamtschwelle und der Differenzquotientenkurve einer Meßreihe jede Messung ergospirometrischer Art an jeder beliebigen Apparatur objektiv nachvollziehen zu können.

Unsere Meßergebnisse der gesamten Arbeitsphase mit Vergleichswerten von geschlossenem : offenem : ventilgesteuertem System von 100 : 100,9 : 98,8 stützen unsere Behauptungen.

G. LITERATUR

BARTELS, H. E. BÜCHERL, C. HERTZ, R. RODEWALD und M. SCHWAB:
Lungenfunktionsprüfungen
(Springer-Verlag) Berlin-Heidelberg-New York 1959

BRANDT, H. J. und H. BÜNAU:
Meßwertverarbeitung durch Analogrechner zur Sofortdarstellung standartisierter Zeitmittelwerte in der Spiroergometrie
Pneumologie **143**, 61 (1970)

COMROE, J. H.; R. E. FORSTER, A. B. DUBOIS, W. A. BRISCOE und E. CARLSEN:
Die Lunge
(Schattauer Verlag) Stuttgart-New York 1968

ECKHOLDT, B.; W. ROTH und K. THIELE:
Methodische Grenzen der objektiven Leistungsprüfung bei Benützung verschiedener Gaswechselsysteme
Zschr. ärztl. Fortbildg. **10**, 62 (1968)

FLEISCH, A.:
Le Pneumotachograph
Helvet. physiol. Acta **14**, 363 (1956)

FREISEL, A.:
Neue Methoden zum Studium des Gasaustausches und der Lungenfunktion
(Thieme Verlag) Leipzig 1956

HANSEN, G.:
Eine synoptische elektronische Anlage für die cardiopulmonale Funktionsdiagnostik
SRW-Nachrichten **29**, 14 (1966)

KNIPPING, H. W.:
Über Funktionsprüfung von Atmung und Kreislauf
Beitr. Klin. Tbk **88**, 503 (1936)

MELLEROWICZ, H.:
Ergometrie
(Urban und Schwarzenberg-Verlag) München-Berlin-Wien (1962)

MELLEROWICZ, H.; KÖNIG und H. REINDELL:
Vorschläge zur Standardisierung der ergometrischen Leistungsmessung
Zstr. Kreisl.forschg. **53**, 586 (1964)

Lebenslauf

Am 26. März 1944 wurde ich, Harald Hauer, als zweiter Sohn des Verwaltungsangestellten Walter Hauer und seiner Ehefrau Anna, geborene Sieber, in Plan bei Marienbad/Böhmen geboren.

Nach der Aussiedlung nach Bayern kam ich 1950 in Erlangen in die Volksschule. Im September 1955 wechselte ich in das hiesige Humanistische Gymnasium Fridericianum über, an dem ich im Juni 1965 das Abitur ablegte.

Im Wintersemester 1965/66 immatrikulierte ich mich an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Im Oktober 1968 bestand ich die ärztliche Vorprüfung. Im Sommer 1971 werde ich voraussichtlich mein Studium mit dem Staatsexamen abschließen.